

# 基于方向金字塔分解与稳定几何失真校正的 鲁棒图像水印算法

杨建新<sup>1</sup>, 王中叶<sup>2</sup>, 李威<sup>3</sup>

(1.常州机电职业技术学院, 常州 213164; 2.南京航空航天大学, 南京 210016;  
3.吉安职业技术学院 机械与电子工程学院, 吉安 343000)

**摘要:** **目的** 为了提高水印算法的抗几何攻击能力, 并兼顾较高的鲁棒性与不可感知性, 设计一种基于方向金字塔分解与稳定几何失真校正的鲁棒图像水印算法。**方法** 首先, 引入方向金字塔, 对载体图像完成分解, 输出对应的低通与高通子带; 将低通子带分割为一系列的非重叠块; 根据载体的亮度、纹理与边缘掩码, 计算水印嵌入强度, 最大程度地平衡水印图像的不可感知性与鲁棒性; 设计水印嵌入方法, 将经过 Arnold 映射加密后的水印嵌入到非重叠子块中, 通过修改载体的方向金字塔分解系数, 获取水印图像; 将不同的攻击类型作用于水印图像, 建立训练样本; 再利用方向金字塔分解训练样本, 计算高通子带的高斯-厄米矩能量, 将其视为特征矢量; 再利用特征矢量对模糊支持向量机完成训练, 以预测几何失真参数, 准确校正受攻击的水印图像; 设计水印检测机制, 从水印图像中复原水印。**结果** 实验数据表明, 与当前图像水印方案相比, 所提算法具有更高的抗几何变换能力, 以及较好的不可感知性与鲁棒性, 其提取的水印失真度最小, 对应峰值信噪比保持在 40 dB 以上。**结论** 所提水印算法具有较高的鲁棒性和视觉隐秘性, 在版权保护、信息防伪等领域具有一定的参考价值。

**关键词:** 图像水印; 方向金字塔; 稳定几何失真校正; 水印嵌入强度; 高斯-厄米矩能量; 模糊支持向量机; 水印检测

中图分类号: TP391 文献标识码: A 文章编号: 1001-3563(2019)01-0196-13

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2019.01.030

## Robust Image Watermarking Algorithm Based on Directional Pyramid Decomposition and Stable Geometric Distortion Correction

YANG Jian-xin<sup>1</sup>, WANG Zhong-ye<sup>2</sup>, LI Wei<sup>3</sup>

(1.Changzhou Vocational Institute of Mechatronic Technology, Changzhou 213164, China; 2.Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China; 3.College of Mechanical and Electronic Engineering, Ji'an College, Ji'an 343000, China)

**ABSTRACT:** The work aims to design a robust image watermarking algorithm based on directional pyramid decomposition and stable geometric distortion correction, in order to improve the watermarking algorithm's ability of resisting geometric attacks and give consideration to both higher robustness and insensitivity. Firstly, the directional pyramid was introduced to decompose the carrier image for outputting the corresponding low pass and high pass subbands. Subsequently, the low pass subbands were divided into a series of non-overlapping blocks. According to the brightness, texture and edge

收稿日期: 2018-05-28

基金项目: 江苏省高校自然科学研究项目(15KJD520005)

作者简介: 杨建新(1981—), 男, 硕士, 常州机电职业技术学院副教授, 主要研究方向为计算机图像、网络通信与信息安全、计算机技术。

mask of the carrier, the embedding strength of the watermark was calculated to balance the imperceptibility and robustness of the watermark image to the maximum extent. Then, the watermark embedding method was designed to embed the watermark encrypted by Arnold map into the non-overlapping subblocks, and the watermark image was obtained by modifying the decomposition coefficient of directional pyramid in the carrier. The training samples were established by applying different attack types to watermark image. The directional pyramid was then used to decompose the training samples for calculating the Gauss Hermite moment energy of the high pass subbands, which was regarded as the feature vector. Then, the feature vector was used to train the fuzzy support vector machine for predicting the geometric distortion parameters and accurately correcting the attacked watermark image. Finally, the watermark detection mechanism was designed to restore the watermark from the watermark image. The experimental data showed that, compared with the current image watermarking scheme, the proposed algorithm had a higher anti-geometric transformation ability, as well as better imperceptibility and robustness with the least distortion degree of extracted watermark, with the corresponding peak signal to noise ratio (PSNR) maintained above 40 dB. The proposed watermarking algorithm has higher robustness and visual insensitivity, which has certain reference value in copyright protection, information security and other fields.

**KEY WORDS:** image watermarking; directional pyramid; stable geometric distortion correction; watermark embedding strength; Gauss Hermite moment energy; fuzzy support vector machine; watermark detection

随着多媒体技术的日益发展,图像因其具有良好的直观表达能力,被广泛应用于版权保护、医学和商业等领域<sup>[1]</sup>。随着软件工程技术的发展,这种免费的图像编辑工具也越来越大,而且功能强大,可以对图像进行肆意修改,使得用户难以判断图像内容的真假<sup>[2]</sup>。这导致了对防止非法使用受版权保护数据的强烈要求,因此,如何防止图像在网络传输中受到攻击,确保其信息真实,已成为当前国内外研究人员的焦点<sup>[3]</sup>。图像水印方法就是一种信息保护的有效手段,它是将水印信息嵌入到载体图像像素中,从而获取一幅与初始载体一模一样的水印图像,具有理想的不可感知性与鲁棒性<sup>[3-4]</sup>。如张正伟等<sup>[4]</sup>为了解决水印嵌入量与图像视觉质量之间的矛盾,设计了基于多尺度分解与预测误差扩展的可逆图像水印算法,对原始图像进行多尺度分解,将其分解为同质块和非同质块,并通过对同质块进行预测误差扩展来嵌入水印信息,再通过计算非同质块信息熵,根据嵌入水印信息量选择合适的非同质块,通过对选取的非同质块进行整数小波变换,在中高频中嵌入剩余水印信息,实验结果验证了其算法的有效性与优越性。虽然该技术采用了预测误差扩展,能够提高算法的水印容量,但是其鲁棒性不理想,不能有效抵御几何失真变换。Khalid等<sup>[5]</sup>为了兼顾水印图像的不可感知性与抗几何攻击能力,提出了基于极谐变换的图像水印技术,借助Arnold映射来混淆初始二值水印,改善算法的不可感知性,并基于精确极谐变换,获取载体的极谐变换矩,通过对选定的极谐变换矩进行量化,利用水印嵌入方法来完成水印信息的嵌入。该技术虽然充分利用了极谐变换的稳定性,使其具备一定的抗几何失真能力,但是,这种水印技术无法有效预测几何失真参数,导致提取的水印信息存在失真问题。Wang等<sup>[6]</sup>为了增强水印图像的抵御几何攻击能力,提出了基于非下采

样Shearlet变换与最小二乘支持向量回归模型的鲁棒水印方案,借助非下采样Shearlet变换分解载体图像,获取图像的低频与高频分量。随后,利用四元极谐变换来计算低频分量对应的系数,通过相应的嵌入方法,将水印信息隐藏到这些系数中,把将训练样本的四元极谐变换系数视为载体的鲁棒特征,对最小二乘支持向量回归模型完成训练,以估算几何失真参数,从而完成图像的校正。实验结果表明去算法具有较强的抗几何攻击能力。此技术能够准确预测几何失真参数,具有较强的鲁棒性,但是,在水印嵌入过程中,其嵌入强度忽略了人眼视觉特性,使其不可感知性有待提高。

为了解决上述问题,提高算法的抗几何攻击能力与不可感知性,文中引入模糊支持向量机,提出基于方向金字塔分解与稳定几何失真校正的鲁棒图像水印算法。首先,利用方向金字塔来从不同尺度和方向来描述图像,获取相应的低通与高通子带;并根据人眼视觉特性,考虑载体的亮度、纹理与边缘信息,计算水印嵌入强度,兼顾较高的隐秘性与抗失真能力;基于水印嵌入方法,将加密后的水印隐藏到低通子带中,获取水印图像;将不同的攻击类型作用于水印图像,建立训练样本;利用方向金字塔分解训练样本,计算高通子带的高斯-厄米矩能量,利用不同的模式来更好的捕获图像特征,将其视为特征矢量,对模糊支持向量机完成训练,利用预测的几何失真参数来准确校正水印图像;设计水印检测机制,复原水印。最后,对所提水印技术的鲁棒性与不可感知性进行验证。

## 1 移动复杂方向金字塔<sup>[7-8]</sup>

移动复杂方向金字塔<sup>[7]</sup>是一种新的图像分解技

术,它具有传统多分辨率分析方法的优良特性,如多分辨率、多向和低冗余率。此外,该技术的子带是可移动的,可提供局部相位信息,并利用拉普拉斯金字塔和一对方向滤波器组来完成图像分解。这2个方向滤波器是通过使用双通道 Fan 滤波器组的二叉树来形成的<sup>[7-8]</sup>。结合拉普拉斯金字塔和方向滤波器的目的是为了提供一种多分辨率和多方向的滤波器组。然而,拉普拉斯金字塔结构对于整体的滤波器组是不重要的。在实际应用中,可以使用任意的移动双通道2D多分辨率滤波器组和双树方向滤波器来得到一个整体可移动的滤波器组<sup>[8]</sup>。第1个输入图像需穿过未经压缩的双通道滤波器组,其需要满足理想的图像重构条件<sup>[8]</sup>:

$$|R_0(w)|^2 + |L_0(w)|^2 = 1 \tag{1}$$

式中:  $L_0(w)$  为一个宽带低通滤波器;  $R_0(w)$  为一个宽带高通滤波器。

整个移动复杂方向金字塔主要有2个部分,一个是双通道方向滤波器的设计,用来实现多分辨率分解;另外一个 Fan 方向滤波器组的设计,以满足相位约束。根据文献[8]可知,这些滤波器具有无限的脉冲响应。为了获得合理的短路,需要考虑足够平滑的过渡带和有效的脉冲响应。在文中算法中,利用 Meyer 函数,在频域中定义理想滤波器,然后通过截断理想滤波器的逆离散傅立叶变换获取近似有效脉冲响应滤波器,因此,这些滤波器都与理想重构相近。以图 1a 为例,利用尺度为 2、方向为 4 的移动复杂方向金字塔对其完成分解,输出的低通子带、高通子带分别见图 1b、图 1c—f。依图 1 可知,通过方向金字塔分解后,能够从不同尺度、不同方向来描述图像信息,从而可以充分提取其鲁棒特征。

## 2 高斯-厄米矩能量<sup>[9-10]</sup>

图像矩被广泛用于模式识别、信号处理和多分辨率分析等领域。为了更好地描述图像特征,文献[9]提出了一种平滑的正交高斯-厄米矩,与其他图像矩相比,不同阶数的高斯-厄米矩(Gaussian Hermite Moments)对应的基函数具有不同的零交叉和形状数量,因此,它可以利用不同的模式来分离图像特征。另外,高斯-厄米矩的基函数非常平滑,对噪声敏感度较低,可以避免因窗口函数不连续而引起的伪影,因此,高斯-厄米矩更加适合用于捕获图像特征。

### 2.1 厄米矩

Hermite 多项式是正交多项式中的其中一个类型,其函数为<sup>[9]</sup>:

$$\begin{cases} P_n = H_n\left(\frac{t}{\sigma}\right) \\ H_n = (-1)^n \exp(t^2) \left(\frac{d^n}{dt^n}\right) \exp(-t^2) \end{cases} \tag{2}$$

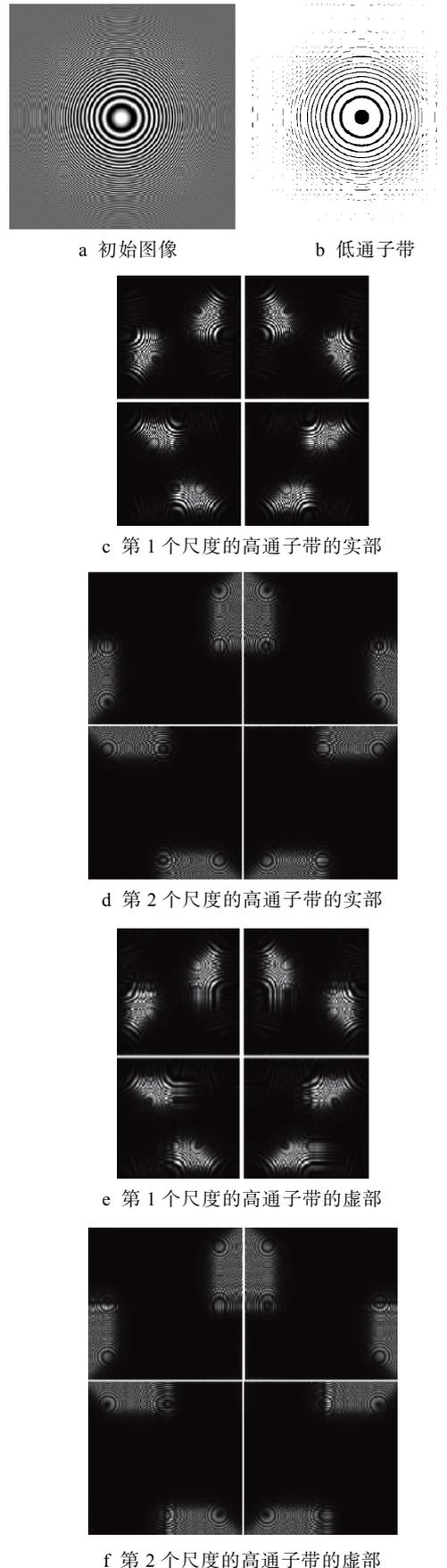


图 1 移动复杂方向金字塔的分解效果  
Fig.1 Decomposition effect of moving complex directional pyramid

式中： $\sigma$  为高斯函数的标准偏差。

对于信号  $S(x)$ ，其一维第  $n$  阶厄米矩  $M_n(x, S(x))$  定义如下<sup>[9]</sup>：

$$M_n(x, S(x)) = \int_{-\infty}^{+\infty} P_n(t) S(x+t) dt \quad (3)$$

$$= \langle P_n(t), S(x+t) \rangle, n = 0, 1, \dots$$

由于图像  $I(x, y)$  是 2D 的，因此，根据式 (3)，对应的 2D  $(p, q)$  阶厄米矩为：

$$M_{p,q}(x, y, I(x, y)) = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} H_{p,q} \left( \frac{u}{\sigma}, \frac{v}{\sigma} \right) I(x+u, y+v) du dv \quad (4)$$

$$H_{p,q} \left( \frac{u}{\sigma}, \frac{v}{\sigma} \right) = H_p \left( \frac{u}{\sigma} \right) \times H_q \left( \frac{v}{\sigma} \right) \quad (5)$$

式中： $H_p, H_q$  均为一维厄米矩。

### 2.2 高斯-厄米矩

依据文献[10]可知，对于信号  $S(x)$ ，其对应的高斯-厄米矩  $M_n(x, S(x))$  定义为：

$$M_n(x, S(x)) = \int_{-\infty}^{+\infty} B_n(t) S(x+t) dt = \langle B_n(t), S(x+t) \rangle \quad (6)$$

$$\begin{cases} B_n(t) = g(t, \sigma) P_n(t) \\ g(t, \sigma) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \sigma \times \exp\left(-\frac{x^2}{2\sigma^2}\right) \end{cases} \quad (7)$$

为了计算高斯-厄米矩  $M_n(x, S(x))$ ，文中使用了如下递归方法：

$$M_n(x, S^{(m)}(x)) = 2(n-1)M_{n-2}(x, S^{(m)}(x)) + 2\sigma M_{n-1}(x, S^{(m+1)}(x)) \quad n \geq 2 \quad (8)$$

$$S^{(m)}(x) = \left( \frac{d^m}{dx^m} \right) S(x), S^{(0)}(x) = S(x) \quad (9)$$

特别地，当  $n=0, 1$  时，相应的高斯-厄米矩  $M_n(x, S(x))$  为：

$$\begin{cases} M_0(x, S(x)) = g(x, \sigma) * S(x) \\ M_1(x, S(x)) = 2\sigma \left( \frac{d}{dx} \right) (g(x, \sigma) * S(x)) \end{cases} \quad (10)$$

式中： $*$  为卷积运算。

同样地，因图像为二维的，因此，根据式 (4)，阶数为  $(p, q)$  的 2D 高斯-厄米矩为：

$$M_{p,q}(x, y, I(x, y)) = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} g(u, v, \sigma) H_{p,q} \left( \frac{u}{\sigma}, \frac{v}{\sigma} \right) I(x+u, y+v) du dv \quad (11)$$

$$H_{p,q} \left( \frac{u}{\sigma}, \frac{v}{\sigma} \right) = H_p \left( \frac{u}{\sigma} \right) \times H_q \left( \frac{v}{\sigma} \right) \quad (12)$$

$$g(u, v, \sigma) = \frac{1}{2} \pi \sigma^2 \exp\left(-\left(\frac{u^2}{2\sigma^2} + \frac{v^2}{2\sigma^2}\right)\right) \quad (13)$$

根据式 (11) 可知，二维高斯-厄米矩是可以分离的，因此，其计算可分解为 2 个 1D 高斯-厄米矩的级联运算：

$$M_{p,q}(x, y, I(x, y)) = \int_{-\infty}^{+\infty} g(u, \sigma) H_p \left( \frac{u}{\sigma} \right) \left[ \int_{-\infty}^{+\infty} g(v, \sigma) H_q \left( \frac{v}{\sigma} \right) I(x+u, y+v) dv \right] du \quad (14)$$

不同阶数的 1D 高斯-厄米矩对应的空间响应见图 2。依图 2 可知，随着矩核的阶数增大，其振动性也在增大。这说明不同阶数的矩核拥有不同的空间响应特性，能够充分描述图像特征。

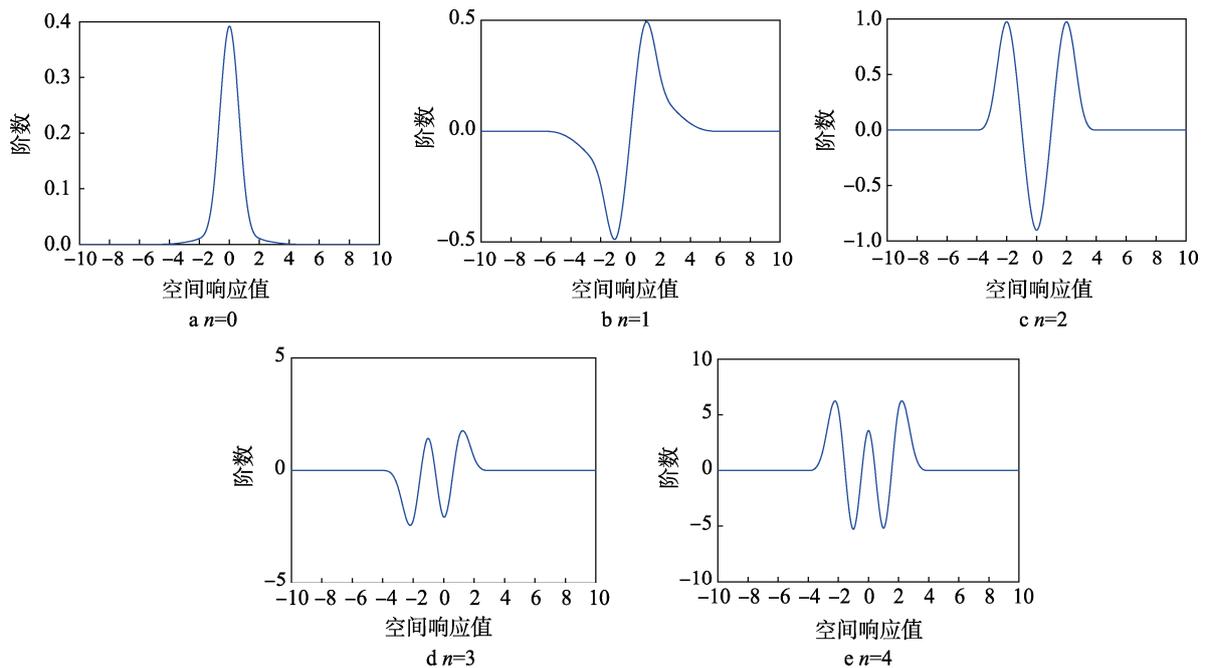


图 2 不同阶数下高斯-厄米矩对应的空间响应

Fig.2 Spatial response of Gauss Hermite moments corresponding to different orders

随后, 利用 2D 高斯-厄米矩  $M_{p,q}(x,y,I(x,y))$  来计算其对应的能量:

$$E_{p,q}(x,y) = M_{p,q}(x,y,I(x,y))^2 \quad (15)$$

以图 1a 为对象, 利用不同阶数  $(p,q)$  对应的 2D 高斯-厄米矩能量见图 3。依图 3 可知, 高斯-厄米矩能量包含了初始图像的绝大部分信息。

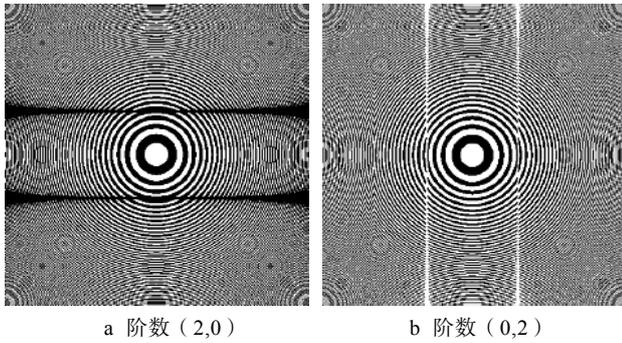


图 3 不同阶数的高斯-厄米矩能量  
Fig.3 Gauss-Hermite moment energy of different orders

### 3 文中鲁棒图像水印算法

所提的基于方向金字塔分解与稳定几何失真校正的鲁棒图像水印算法过程见图 4。由图 4 可知, 所提水印方法有 3 个过程: 水印的嵌入, 见图 4a; 稳定几何失真校正机制, 见图 4b; 水印信息的检测, 见图 4c。利用移动复杂方向金字塔来分解载体图像; 并将分解后的低通子带分割为一系列的非重叠块; 通过考虑人眼视觉特性, 计算水印嵌入强度, 基于水印嵌入方法, 将加密水印嵌入到非重叠子块中, 形成水印图像; 联合高通子带的高斯-厄米矩能量与支持向量机, 设计稳定几何失真校正机制, 预测失真参数, 准确校正受攻击的水印图像; 最后, 利用水印检测方法来恢复水印。

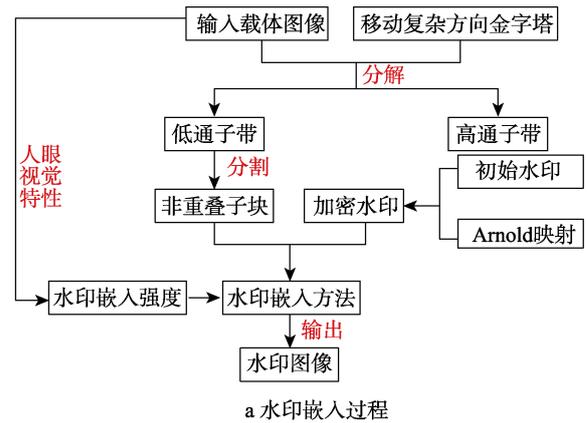
#### 3.1 水印信息的嵌入

1) 令  $I = \{f(x,y), 0 \leq x < M, 0 \leq y < N\}$  代表大小为  $M \times N$  的宿主图像。其中,  $f(x,y)$  为点  $(x,y)$  的像素值。  $W = \{w(i,j), 0 \leq i < P, 0 \leq j < Q\}$  为水印, 大小为  $P \times Q$ , 且  $w(i,j) \in [0,1]$ 。为了消除像素空间关系, 增强整个水印系统的鲁棒性, 文中引入 Arnold 变换<sup>[11]</sup>来置乱水印  $W$ :

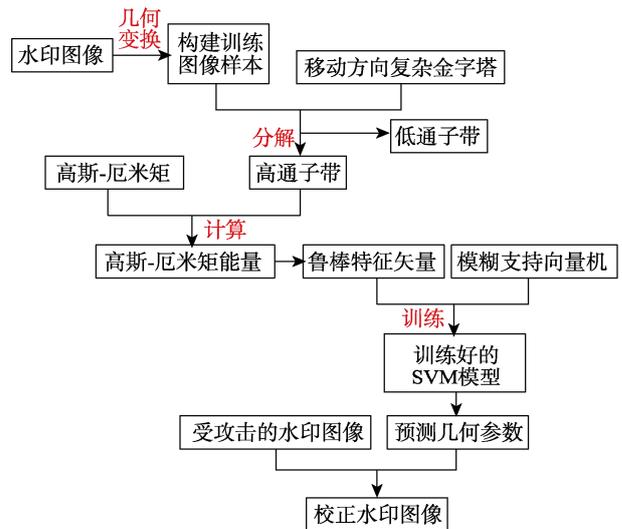
$$\begin{pmatrix} x' \\ y' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ 1 & 2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} \pmod{N} \quad (16)$$

其中,  $(x,y)$  为水印的像素坐标;  $(x',y')$  为加密后的像素坐标;  $N$  为图像矩的阶数。

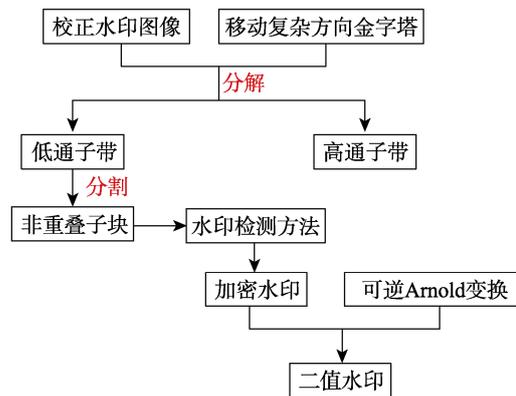
根据式 (16) 的加密后, 可输出混淆水印  $W' = \{w'(i,j), 0 \leq i < P, 0 \leq j < Q\}$ 。



a 水印嵌入过程



b 稳定几何校正机制



c 稳定几何校正机制

图 4 所提水印算法的过程

Fig.4 Process of the proposed watermarking algorithm

2) 根据“1 移动复杂方向金字塔”章节的过程, 对载体图像  $I$  完成分解, 形成一个低通子带  $A$  和一系列的高通子带  $D_{11}^R, D_{12}^R \dots D_{Jd}^R, D_{11}^I, D_{12}^I \dots D_{Jd}^I$ 。其中,  $J, d$  分别为尺度、方向数量;  $R, I$  分别为高通自带的实部、虚部。

3) 将低通子带  $A$  分割为非重叠子块  $B_{ij} \left( i = 0, 1 \dots \frac{M}{P-1}; j = 0, 1 \dots \frac{N}{Q-1} \right)$ 。每个子块的尺寸为

$P \times Q \times k$ ,  $k$  为移动复杂方向金字塔系数的数量, 见图 5。

$$B_{ij} = b_{ij}(x, y), 0 \leq x < P, 0 \leq y < Q \quad (17)$$

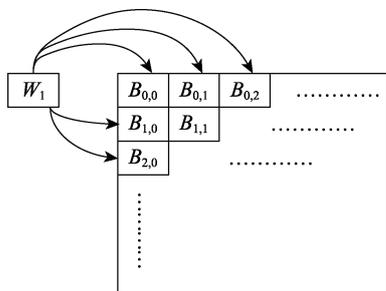


图 5 水印嵌入  
Fig.5 Watermark embedding

4) 设计水印嵌入方法, 将加密水印  $W$  嵌入到非重叠子块  $B_{ij}$  中, 修改载体的移动复杂方向金字塔系数:

$$b'(i, j) = \begin{cases} \left( \lambda(i, j) - \frac{1}{2} \right) \Delta & \text{if } \text{mod}(\lambda(i, j) + w'(i, j), 2) = 1 \\ \left( \lambda(i, j) + \frac{1}{2} \right) \Delta & \text{if } \text{mod}(\lambda(i, j) + w'(i, j), 2) = 0 \end{cases} \quad (18)$$

$$\lambda(i, j) = \text{round} \left( \frac{b(i, j)}{\Delta} \right) \quad (19)$$

式中:  $b(i, j)$  为初始的移动复杂方向金字塔系数;  $b'(i, j)$  为嵌入水印后的移动复杂方向金字塔系数;  $\Delta$  为水印强度因子;  $w'(x, y)$  为加密水印信息。

在上述水印信息的嵌入过程中, 通常会取较大的  $\Delta$  值, 以增强算法抗击几何变换的能力; 但是, 较大的  $\Delta$  会降低水印图像的视觉效果。为了最大程度地平衡水印图像的不可感知性与鲁棒性, 文中利用人眼视觉系统 HSV (Human Visual System) [12] 来实现这种平衡。通过利用 HSV, 使  $\Delta$  自适应于图像的特征, 在改善鲁棒性的同时, 最大程度提高其隐秘性。

HSV 主要分为编码、表述和解码 3 个步骤[13]。在实际应用中, 存在很多因素影响人眼对目标的敏感度。例如, 角膜表面会引起折射, 瞳孔的圆形入口会引起衍射, 以及光学透镜具有色差效应等[12]。这表明 HSV 对外界较小刺激的敏感度较低。而这种不敏感性可用于提高水印信息在载体中的隐秘性。为此, 利用载体的亮度、纹理与边缘掩码, 计算  $\Delta$ :

$$\Delta = Q = \text{Max} \left( \rho \times M_L \times \min \left( M_T, F \left( M_E, E_{DI} \left( E_{DE} (I) \right) \right) \right) \right) \quad (20)$$

式中:  $\rho \in [0.4 \ 0.5]$  为权重系数;  $M_L$  为载体的亮度掩码;  $M_T$  为载体的纹理掩码;  $I$  为载体图像;  $E_{DI}()$  为边缘检测算子;  $E_{DE}()$  为扩展运算;  $F$  为滤波算子;  $Q$  为 HSV 掩码。

以图 1a 为例, 其对应的  $M_L, M_T, E_{DI}$  分别见图

6a—c。以此构成的 HSV 掩码见图 6d。

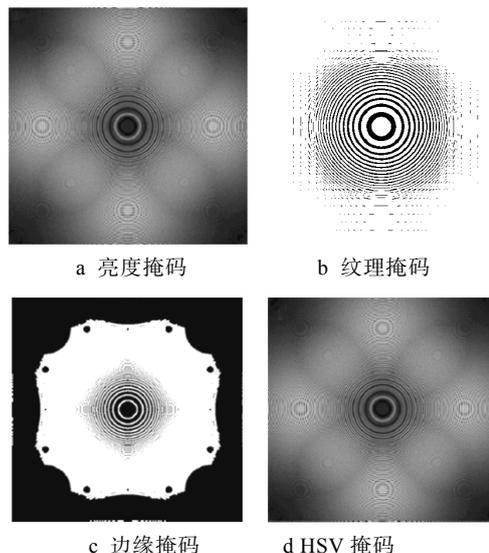


图 6 HSV 掩码  
Fig.6 HSV mask

5) 利用上述得到的水印子块  $B'_{ij}$  替代初始的低通子带对应的子块, 从而形成水印图像  $I'$ 。

以图 7a 为初始水印, 经过式 (15) 置乱后, 结果见图 7b。随后, 以图 1a 为载体, 利用上述水印嵌入过程, 将图 7b 嵌入到图 1a 中, 输出数据见图 7c。从人眼视觉上看, 形成的水印图像与载体图像非常相似, 没有明显的差异, 各自的直方图也是很相似, 分别见图 7d、图 7e。这说明文中水印技术具有较高的不可感知性, 非授权用户无法从中轻易获取水印信息。

### 3.2 稳定几何失真校正机制

为了增强水印图像的抗攻击能力, 防止复原的水印图像出现失真, 文中利用移动复杂方向金字塔与模糊支持向量机 [2, 14] FSVM (Fuzzy Support Vector Machine), 设计了稳定几何校正机制。令水印图像为  $I' = \{f'(i, j), 0 \leq x \leq M', 0 \leq y \leq N'\}$ 。则相应的几何校正过程如下所述。

1) 建立训练样本。一般而言, 几何失真包含多种形式, 如旋转、缩放、裁剪与平移等 [2]。在文中算法中, 主要考虑旋转、缩放与平移。为了较好地完成 FSVM 机制的训练, 需要借助合理的训练样本  $H^k$  ( $k=0, 1, 2, \dots, K-1$ )。为此, 将旋转、缩放与平移分别施加于水印图像  $I'$ , 以构建样本集  $\Omega_k$ 。所施加的几何失真参数分别用  $t_x^k, t_y^k, S^k, \theta^k$  来表示。其中,  $t_x, t_y$  为沿着  $x, y$  轴的运动距离;  $S$  为尺度因子;  $\theta$  为旋转角度。

2) 对  $H^k$  ( $k=0, 1, 2, \dots, K-1$ ) 中的图像完成尺度为 2、方向为 4 的移动复杂方向金字塔分解, 得到低通子带和高通子带。

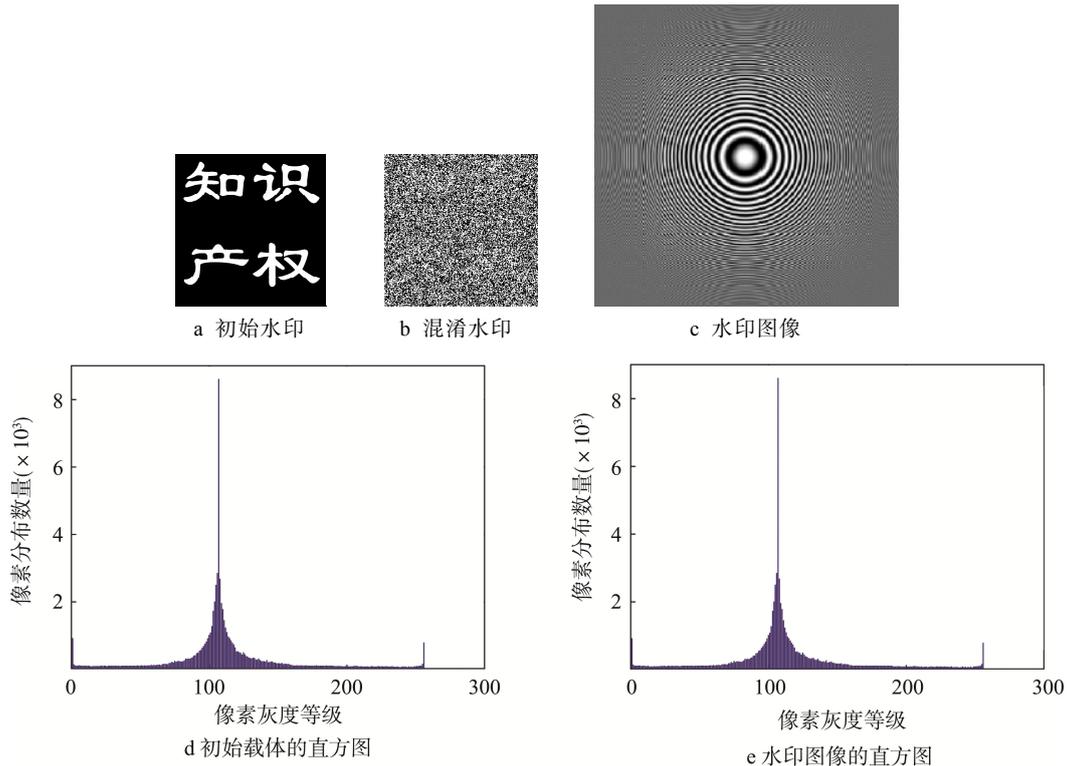


图7 水印信息的嵌入测试  
 Fig.7 Embedding test of watermark information

3) 根据式(15), 计算高通子带实部对应的高斯-厄米矩能量  $E$ 。由于低通子带包含了图像的边缘信息, 而高通子带却罕有图像得丰富信息, 考虑到所提算法施加的失真类型为全局几何变换, 文中选择高通子带实部的 8 个高斯-厄米矩能量  $E_{0,2}, E_{2,0}$  视为载体图的特征矢量, 记为  $(f_1^k, f_2^k, f_3^k, f_4^k, f_5^k, f_6^k, f_7^k, f_8^k)$ 。

4) 再联合几何失真参数  $t_x^k, t_y^k, S^k, \theta^k$ , 构建了训练样本  $\Omega$  为:

$$\Omega = (f_1^k, f_2^k, f_3^k, f_4^k, f_5^k, f_6^k, f_7^k, f_8^k, t_x^k, t_y^k, S^k, \theta^k) \quad (21)$$

5) 将  $\Omega$  作为 FSVM 机制的输入矢量, 对 FSVM 完成训练, 详细的 FSVM 及其训练过程见文献[2]。并利用已训练好的 FSVM 来实现失真参数的预测,

输出  $t_x^k, t_y^k, S^k, \theta^k$ 。根据输出数据, 对攻击后的水印图像进行校正。

为了体验所提稳定几何失真校正方法的精度, 考虑一般性, 从 USC-SIPI 集<sup>[15]</sup>中任意选择一幅图像作为测试对象, 见图 8a; 并对其施加 15° 的旋转、y 轴移动 10、x 与 y 轴同时移动 10、缩放因子为 1.5 等 4 种攻击, 形成的训练样本见图 8b—e。再从 USC-SIPI 集<sup>[15]</sup>选择 Barbara 来完成校正实验, 见图 9a, 然后, 对其旋转 45°、沿 y 轴平移 15、x 与 y 轴同时移动 15、放大 1.5 倍, 输出结果见图 9b, 9d, 9f, 9h。再根据稳定失真校正过程, 准确预测失真参数, 以校正图像见图 9c, 9e, 9g, 9i, 预测结果见表 1。根据这些数据可知, 所提的稳定几何校正方法具有良好的鲁棒性, 可以准确实现图像的校正。



图8 构建训练样本  
 Fig.8 Construction of training samples



图 9 几何校正结果

Fig.9 Geometric correction results

表 1 模糊支持向量机的预测结果

Tab.1 Prediction results of fuzzy support vector machine

变换类型	几何失真参数值	预测结果
角度旋转	45°	44.999 98°
平移变换	[0, 15]	[0.000 02, 15.0009]
平移变换	[15, 15]	[14.9998, 15.0012]
尺度变换	1.5	1.499 97

### 3.3 水印信息的提取

水印提取是水印嵌入的逆过程<sup>[2]</sup>, 令校正后的水印图像为  $I^*$ , 则其水印提取过程如下所述。

1) 根据“1 移动复杂方向金字塔”章节的过程, 对载体图像  $I^*$  完成分解, 形成一个低通子带  $A'$  和一系列的高通子带。

2) 将低通子带  $A'$  分割为非重叠子块  $B'_{ij} \left( i=0,1,\dots,\frac{M'}{P-1}; j=0,1,\dots,\frac{N'}{Q-1} \right)$ 。每个子块的尺寸为  $P \times Q \times k'$ ,  $k'$  为移动复杂方向金字塔系数的数量:

$$B'_{ij} = b'_{ij}(x, y), 0 \leq x < P, 0 \leq y < Q \quad (22)$$

3) 设计水印检测机制, 从校正水印图像  $I^*$  中提取加密水印:

$$w''(i, j) = \begin{cases} 1 & \text{if } \text{mod}(\lambda'(i, j), 2) = 1 \\ 0 & \text{if } \text{mod}(\lambda'(i, j), 2) = 0 \end{cases} \quad (23)$$

$$\lambda'(i, j) = \left\lfloor \frac{b''(i, j)}{\Delta} \right\rfloor \quad (24)$$

4) 利用可逆 Arnold 变换出来加密水印, 输出初始水印信息。

以图 7c 为对象, 根据上述水印检测方法, 可得

到初始水印, 见图 10。由图 10 可知, 所提取的水印与初始水印之间的相似度很高, 其峰值信噪比为 49.23 dB。



图 10 提取水印质量

Fig.10 Extraction of watermark quality

## 4 实验结果及分析

为了测试文中水印方法的不可感知性与鲁棒性, 基于 Matlab 平台完成验证与分析, 同时, 为了突出所提方案的优势, 将文献[1]、文献[4]、文献[5]、文献[6]视为对照组。测试条件为: Intel 电脑, 4 GHz, 双核 CPU, 800 GB 硬盘, 以及 4 G 的内存。考虑一般性, 从 USC-SIPI 图像集<sup>[15]</sup>中随机选择 3 幅图像, 见图 11a—c, 它们的尺寸均为 512×512。将图 11d—f 视为该次实验的水印信息, 大小均为 64×64。通过反复测试, 试验参数设置为: 训练图像  $K=100$ 、高斯-厄米矩的阶数  $p=2, q=4$ 。客观量化指标: 不可感知性和鲁棒性。

### 4.1 不可感知性能测试分析

利用文中方法、文献[1]、文献[4]、文献[5]和文献[6]的水印嵌入过程, 将图 11d—f 分别嵌入到图 11a—c 中, 得到相应的水印图像见图 12—14。由输

出图像可知,所提算法与2种对照组技术均有较高的视觉隐秘性,水印信息均被充分嵌入到载体中,整个水印图像与初始载体没有明显的差异,人眼无法从中获取水印的相关信息。

为了客观评估3种水印技术的差异,文中引入差

分图<sup>[3]</sup>,通过分析3种水印图像与载体的像素灰度分布拟合程度来量化。以图12a、图12c—g,以及图13a、图13c—g为样本,嵌入率设置均为0.4 bpp,则3种方法的差分图见图15和图16。由测试结果可知,所提技术的水印图像与载体之间的灰度分布拟合度最

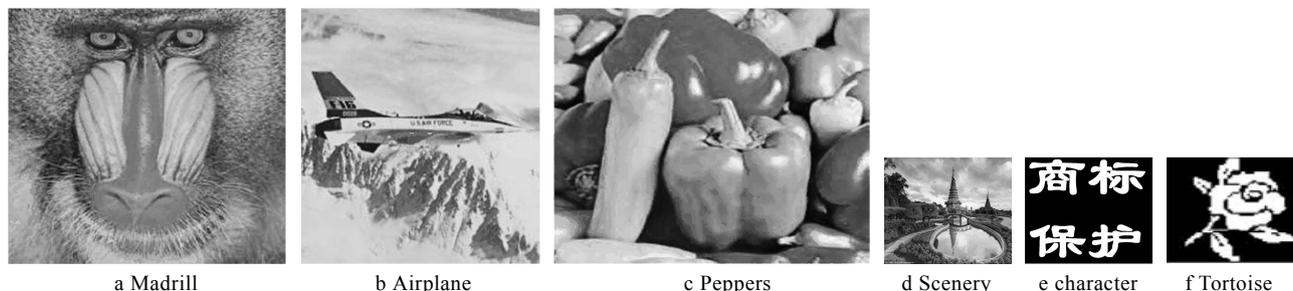


图11 载体图像及水印  
Fig.11 Carrier image and watermark

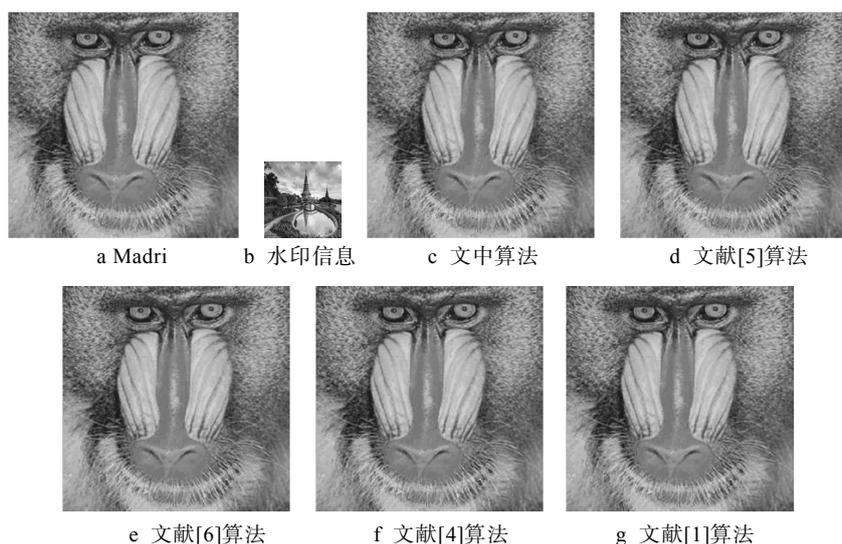


图12 Madri 图像不同算法的输出水印图像  
Fig.12 Output watermarking image of Madri image with different algorithms

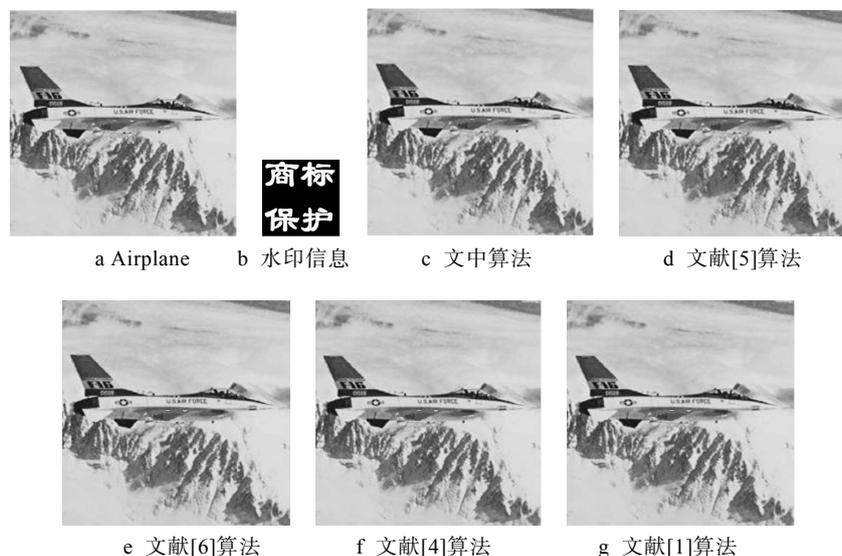


图13 Airplane 图像不同算法的输出水印图像  
Fig.13 Output watermarking image of Airplane image with different algorithms

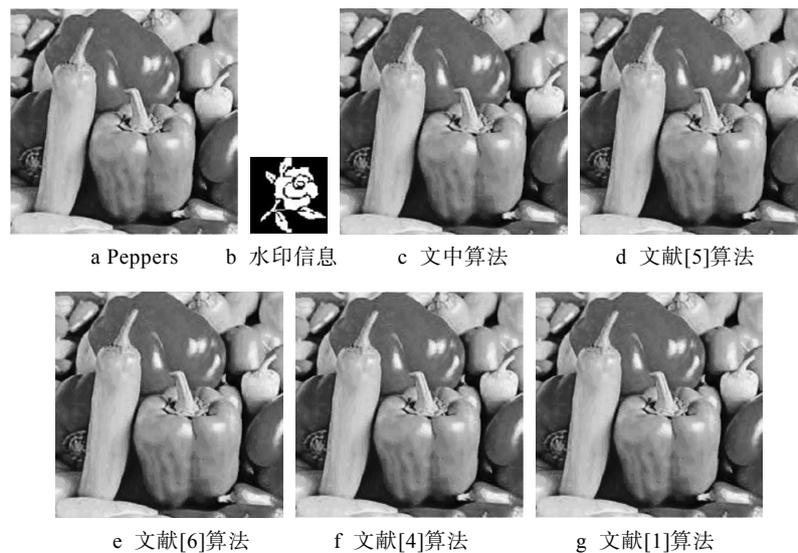


图 14 Peppers 图像不同算法的输出水印图像

Fig.14 Output watermarking image of Peppers image with different algorithms

高，阶梯效应很小，见图 15a 与图 16a；文献[5]、文献[6] 2 种技术的差分图不理想，其中，文献[5]的像素灰度拟合度较低，存在严重的阶梯效应，见图 15b、图 16b，文献[6]的像素灰度拟合度要优于文献[5]，见图 15c、图 16c，而文献[4]、文献[1]的灰度分布与载体的拟合度均较为理想，但是，仍然存在轻微的阶梯效应，分别见图 15d—e、图 16d—e，这将影响了水印信息在载体中的不可感知性。主要是因为文中算法利用了 Arnold 变换对水印进行了加密，充分破坏了像素空间关系，且在水印嵌入过程中，利用人眼视觉特性来计算水印嵌入强度，将加密后的水印嵌入到载体的低频子带中，对载体的修改范围较小，以最大程度改善水印信息在载体中的隐秘性。文献[5]虽然也采用了 Arnold 变换来混淆水印，但是，此方法在水印嵌入过程中没有考虑人眼视觉特性，而且是将水印嵌入到整个载体的极谱变换域中，对载体的修改范围较大，导致其不可感知性不佳。文献[6]则是直接将水印信息嵌入到载体的低频分量中，且其忽略了水印嵌入强度对水印结果的影响，使其不可感知性要低于所提技术，但是由于其对载体的修改范围较小，因此，其不可感知性要优于文献[5]。文献[1]算法则是将水印信息嵌入到 Hadamard 变换系数中的中频成分中，相对于低频成分，而中频系数具有更低的人眼敏感程度，使其具有良好的不可感知性，要优于文献[6]，但是水印嵌入强度忽略了人眼视觉特性，使其隐秘性略低于文中技术。文献[4]是通过借助多尺度分解与预测误差扩展技术，将水印信息隐藏到载体图像的非同质块所对应的中高频成分里面，虽然其嵌入位置较好，但是其对载体的修改范围较大，使其不可感知性不理想，但是要优于文献[5]。

## 4.2 鲁棒性测试

为了体现文中算法的鲁棒性，以图 13c—g 为例，对其表 2 中的几何攻击类型，利用文中方法、文献[1]、文献[4]、文献[5]和文献[6]各自的水印检测方法来提取水印，并引入利用峰值信噪比 PSNR、相关系数  $NC^{[16]}$  来客观评估，测试结果见表 3。由表 3 可知，对于表 2 中的 4 种几何变换，所提算法具有更高的稳健性，对于每种攻击，其提取的水印图像质量最高，失真度最小，对应的 PSNR 与 NC 值均为最大。文献[6]的抗几何攻击能力与所提算法相当，其复原的水印质量也较高，但是，文献[5]的抗几何失真能力较弱，其提取水印均存在较大的失真，对应的 PSNR 与 NC 值要小于所提技术与文献[6]。文献[1]算法的抗旋转与缩放攻击能力较为理想，但是，对应噪声与组合攻击的鲁棒性不理想，对应的 PSNR 与 NC 值要小于所提技术与文献[6]。文献[4]的整体鲁棒性较低，除了缩放攻击之外，抵御其他几何变换的能力较弱，对应的 PSNR 与 NC 值较低，尤其是组合攻击，其提取水印的 NC 值低于 0.5。原因是文中水印算技术利用被攻击后水印图像的 8 个高通子带对应的高斯-厄米矩视为鲁棒特征矢量来训练 FSVM 机制，以此设计了稳定几何失真校正方法，基于训练好的 FSVM 来准确预测几何变换参数，并根据预测结果来校正水印图像，从而显著提高了算法对几何攻击的适应性。文献[6]也采用了校正方法，将训练样本的四元极谱变换系数视为载体的鲁棒特征，对最小二乘支持向量回归模型完成训练，以估算失真参数，根据预测结果来校正图像。文献[5]则是充分利用极谱变换的稳定性来抵御几何变换，但其无法准确预测变换参数，使其校正结果不理想。文献[4]是利用多尺度分解来得到载体的同

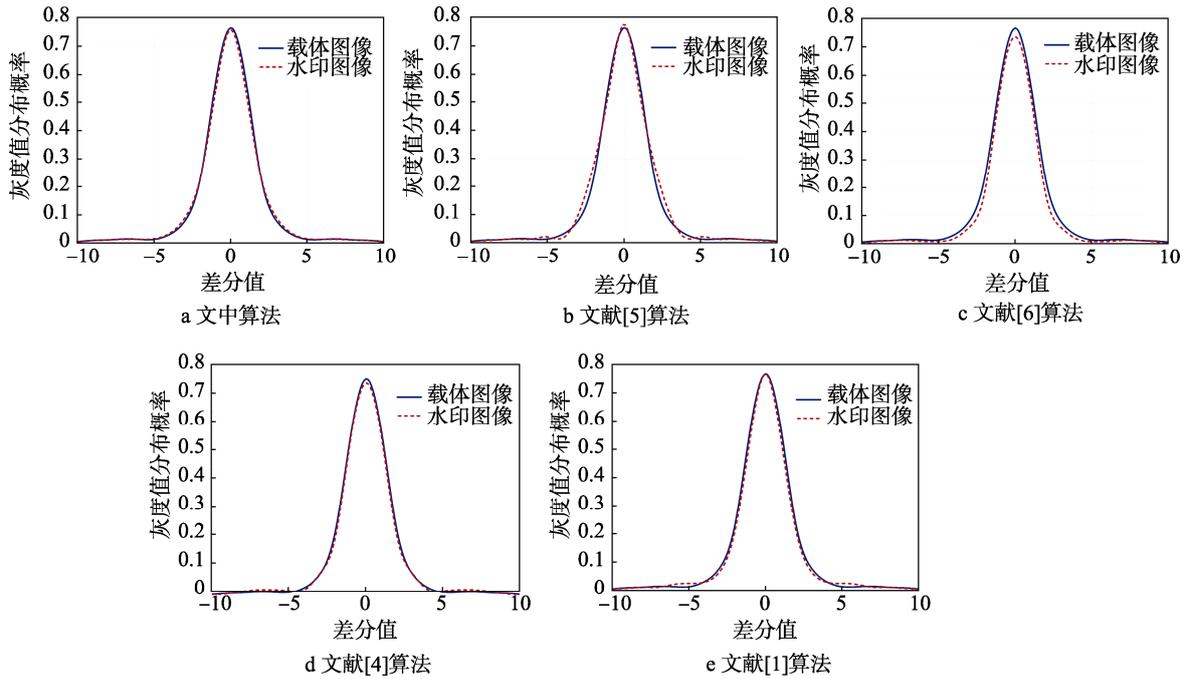


图 15 5种算法输出的水印图像对应的差分图

Fig.15 Differential graph corresponding to the watermarking image outputted by five algorithms

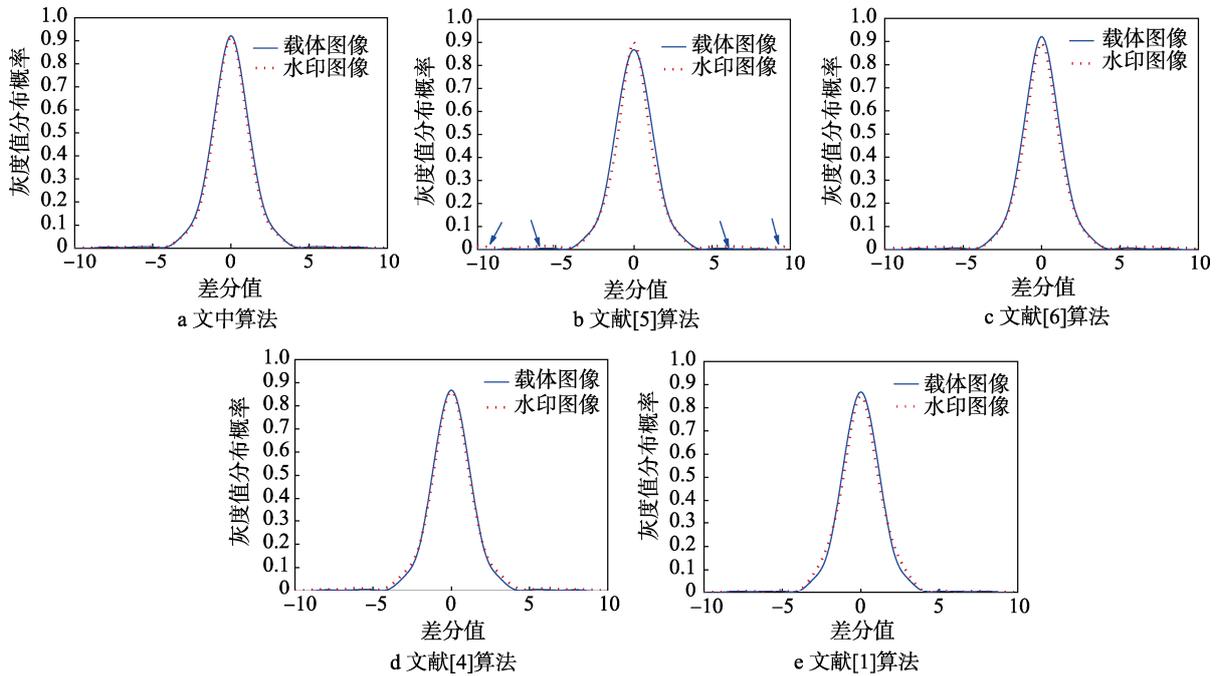


图 16 5种算法输出的水印图像对应的差分图

Fig.16 Differential graph corresponding to the watermarking image outputted by five algorithms

质块和非同质块,再基于误差扩展技术,根据非同质块信息熵确定的信息量来完成水印嵌入,但是该技术选择的中高频系缺乏抵御几何攻击的能力,使其鲁棒性较低。文献[1]则是利用 Hadamard 变换来获取载体的系数,并找出鲁棒性与透明性较好的 Hadamard 系数对应的位平面作为水印嵌入位置,该技术对旋转、缩放等几何变换具有较好的鲁棒性,但是这种位平面

对噪声与组合攻击不理想。

表 2 几何失真变换及其参数值  
Tab.2 Geometric distortion transformation and its parameter value

变换类型	角度旋转	缩放	椒盐噪声	旋转+平移
参数值	45°	0.2	0.03	45°+沿 x 轴移动 10

表3 5种算法的鲁棒性测试结果  
Tab.3 Robustness test results of five algorithms

变换类型	文中算法			文献[5]			文献[6]			文献[1]			文献[4]		
	PNSR /dB	NC	复原水印	PNSR /dB	NC	复原水印	PNSR /dB	NC	复原水印	PNSR/dB	NC	复原水印	PNSR /dB	NC	复原水印
旋转	45.69	0.982		45.52	0.976		43.97	0.962		43.18	0.957		34.28	0.815	
缩放	48.27	0.991		42.87	0.939		46.91	0.989		45.82	0.984		41.39	0.918	
椒盐噪声	49.03	0.998		40.57	0.882		48.79	0.993		36.95	0.857		38.54	0.869	
旋转+缩放	41.28	0.903		30.16	0.533		43.04	0.949		31.64	0.627		28.73	0.491	

## 5 结语

利用基于方向金字塔分解方法与支持向量机,设计了鲁棒性图像水印技术。利用移动复杂方向金字塔完成载体的多尺度与多方向分解,获取低通与高通子带;并考虑人眼视觉特性,计算水印嵌入强度,根据相应的水印嵌入方法,将经过 Arnold 变换加密后的水印信息隐藏到低通子带中,得到了水印图像;建立训练样本,联合方向金字塔分解与高斯-厄米矩能量理论,设计了几何校正机制,准确预测几何失真参数,完成水印图像的恢复;并根据水印检测方法,完成水印的复原。实验结果验证了所提算法的合理性与优越性。

所提算法虽然具有较好的抗几何失真能力,但是其是同等容量的水印信息嵌入到没割像素中,忽略了不同像素之间的差异,使得整个水印系统的水印容量不理想。后续,将引入混合进制系统与误差扩展机制,对水印嵌入过程进行完善,使得算能够根据不同区域的像素分配不同的水印容量,扩大水印容量。

### 参考文献:

- [1] 罗富贵, 李明珍. 基于卷积核分解的深度 CNN 模型结构优化及其在小图像识别中的应用[J]. 井冈山大学学报(自然科学版), 2018, 39(2): 31—39.  
LUO Fu-gui, LI Ming-zhen. Structural Optimization of Deep CNN Model Based on Convolution Kernel Decomposition and Its Application in Small Image Recognition[J]. Journal of Jinggangshan University(Natural Science Edition), 2018, 39(2): 31—39.
- [2] WANG Chun-peng, WANG Xing-yuan, ZHANG Chuan. Geometric Correction Based Color Image Watermarking Using Fuzzy Least Squares Support Vector Machine and Bessel K Form Distribution[J]. Signal Processing, 2017, 134(12): 197—208.
- [3] 姚军财. 基于小波变换和奇异值分解的图像水印算法研究[J]. 光学技术, 2017, 43(5): 439—444.  
YAO Cai-jun. Image Watermarking Algorithm Based on Wavelet Transform and Singular Value Decomposition[J]. Optical Technology, 2017, 43(5): 439—444.
- [4] 张正伟, 吴礼发, 严云洋. 基于多尺度分解与预测误差扩展的可逆图像水印算法[J]. 计算机科学, 2017, 44(12): 100—104.  
ZHANG Zheng-wei, WU Li-fa, YAN Yun-xiang. Reversible Image Watermarking Algorithm Based on Multi-Scale Decomposition and Prediction Error Expansion[J]. Computer Science, 2017, 44(12): 100—104.
- [5] KHALID M H, MOHAMED M D. Invariant Image Watermarking Using Accurate Polar Harmonic Transforms[J]. Computers and Electrical Engineering, 2017, 62(8): 429—447.
- [6] WANG Xiang-yang, XU Huan, ZHANG Si-yu. A Color Image Watermarking Approach Based on Synchronization Correction[J]. Fundamenta Informaticae, 2018, 158(4): 385—407.
- [7] WANG Jin-hua, WANG Wei-qiang, LI Bing. Exposure Fusion Via Sparse Representation and Shiftable Complex Directional Pyramid Transform[J]. Multimedia Tools and Applications, 2017, 76(14): 15755—15775.
- [8] LIU Qiao-hong, LIN Min, LI Bin. Image Denoising Using Multivariate Model in Shiftable Complex Directional Pyramid Domain and Principal Neighborhood Dictionary in Spatial Domain[J]. Optik-International Journal for Light and Electron Optics, 2015, 126(9): 967—971.
- [9] IMRAN S M. Differential Components of Discriminative 2D Gaussian-Hermite Moments for Recognition of Facial Expressions[J]. Pattern Recognition, 2016, 56(3): 100—115.

- [10] BO Y, JAN F. Design of High-order Rotation Invariants From Gaussian-Hermite Moments[J]. Signal Processing, 2015, 113(12): 61—67.
- [11] SHABIEH F, NAZEER M. A Novel Image Encryption Based on Algebraic S-box and Arnold Transform[J]. 3D Research, 2017, 8(3): 21—32.
- [12] HU H T, CHANG J R. Robust Blind Image Watermarking By Modulating the Mean of Partly Sign-Altered DCT Coefficients Guided by Human Visual Perception[J]. AEU-International Journal of Electronics and Communications, 2016, 70(10): 1374—1381.
- [13] QI Hui-yan. Human Visual System Based Adaptive Digital Image Watermarking[J]. Signal Processing, 2008, 88(1): 174—188
- [14] FEI Gong, WEI Jin. Convective Clouds Detection in Satellite Cloud Image Using Fast Fuzzy Support Vector Machine[J]. Optoelectronic Engineering, 2017, 44(9): 872—881.
- [15] BIRAJDAR G. Blind Method for Rescaling Detection and Rescale Factor Estimation in Digital Images Using Periodic Properties of Interpolation[J]. AEU: International Journal of Electronics and Communications, 2014, 68(7): 644—652.
- [16] 杜荔, 高利平, 温馨. 基于 CS-SCHT 域的相幅结合水印算法[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2018, 39(4): 492—496.
- DU Li, GAO Li-ping, WEN Xing. Robust Watermarking Algorithm Based on Combination of Phase and Amplitude of CS-SCHT Domain[J]. Journal of Northeastern University(Natural Science Edition), 2018, 39(4): 492—496.